

基于自适应神经网络的磁编码器角度误差 补偿算法^{*}

何 良, 王 爽, 李君伟

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 针对磁编码器中各类误差导致的解码精度低的问题, 在神经网络原理的基础上提出单层自适应神经网络对正弦信号中存在的幅值不相等、相位不正交、直流偏置、谐波与噪声等误差进行补偿。采用锁相环算法对补偿后的正弦信号进行解码。电路中采用 TLE5501 磁阻芯片检测角度变化, 利用 TL082C 运放芯片对信号进行调理, 最后采用 STM32G431 单片机验证算法的性能。通过仿真与试验验证, 证明了该算法的有效性与可行性。

关键词: 磁编码器; 自适应神经网络 (ANN); 误差补偿; 锁相环 (PLL)

中图分类号: TN762 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)06-0015-06

doi: 10.12177/emca.2023.055

Compensation Algorithm of Angle Error for Magnetic Encoder Based on Adaptive Neural Network^{*}

HE Liang, WANG Shuang, LI Junwei

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the low decoding accuracy caused by various errors in the magnetic encoder, a single-layer adaptive neural network is proposed based on the principle of neural network to compensate the errors such as amplitude inequality, phase non-orthogonality, DC bias, harmonic and noise in the sine and cosine signals. The phase-locked loop algorithm is used to decode the compensated sine and cosine signals. In the circuit, the TLE5501 magnetoresistance chip is used to detect the change of angle, the TL082C operational amplifier chip is used to adjust the signal, and the STM32G431 single chip computer is used to verify the performance of the algorithm. The effectiveness and feasibility of the algorithm are verified by simulation and experiment.

Key words: magnetic encoder; adaptive neural network (ANN); error compensation; phase-locked loop (PLL)

0 引 言

角度测量是电机驱动系统中的一项关键技术, 广泛应用于机器人、航空航天和工业自动化^[1]等多种行业。由于磁编码器具有体积小、可靠性高、环境适应性强和价格低等优点, 常应用于伺服

电机的位置反馈^[2]。磁编码器作为当下的研究热点, 其性能的提升对工业生产具有重大意义。

目前, 基于磁编码器误差补偿算法的研究大多存在误差补偿单一、算法复杂、响应速度慢等问题。文献[3]提出的相位自适应锁相环(PLL)对相位误差具有良好的补偿效果, 但未解决带宽输

收稿日期: 2023-02-17; 收到修改稿日期: 2023-03-01

^{*} 基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(19ZR1418600)

作者简介: 何 良(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

王 爽(1977—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子与电机驱动控制。

入问题。文献[4]提出一种多项式拟合算法,并且拟合出幅值与相位的误差,通过查表进行补偿,其对谐波、直流偏置等误差的抑制效果较差。文献[5]在同步旋转坐标系的基础上提出双同步旋转坐标系 PLL 法,该方法对误差信号有抑制作用且精度高。然而,其缺点在于系统中包含低通滤波器与解耦环节,响应时间长。文献[6]提出采用改进型双二阶广义积分器解码技术对信号的正序分量进行提取,引入椭圆拟合技术辨别误差参数,通过误差补偿提高了解码精度,但该算法难以抑制直流偏置和高频谐波。

本文分析了磁编码器的工作原理,在神经网络的基础上,根据正余弦误差的特点,提出了单层自适应神经网络(ANN)对各类误差进行综合补偿。所提算法通过将各类误差分开求解和并行逼近的方式对误差进行实时补偿,然后将补偿后的信号输入 PLL 进行解码。试验电路中采用 TLE5501 作为磁阻芯片采集磁场的变化,然后利用 TL082C 作为信号调理电路的运放芯片,采用 ST 公司的 STM32G431 单片机(MCU)作为逻辑处理单元数字化实现所提算法。最后,仿真与试验结果表明所提算法具有综合误差补偿能力强、响应时间快、精度高、算法简单的优势。

1 磁编码器工作原理

磁编码器主要包括四个部分:磁阻传感器、信号调理、微处理器与通信模块。其中,磁阻芯片将变化的磁场变换为正余弦变化的电压;信号调理由运放芯片组成;微处理器将输入的正余弦信号解算为角度信号;通信模块将角度信息以通信协议的形式传输。磁编码器的信号框图如图 1 所示。

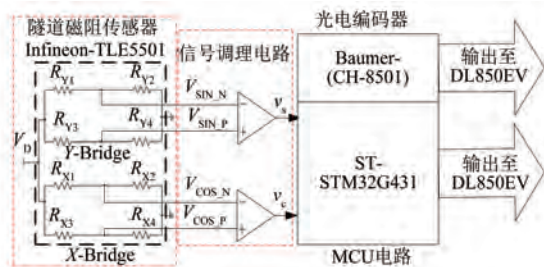


图 1 磁编码器信号框图

理想情况下 MCU 中用于角度解码的正余弦

信号如下所示:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_s \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin \theta_m \\ V_m \cos \theta_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: V_m 为理想正余弦的幅值; θ_m 为电机角度。

此时,采用 PLL 解码方式可以有效解算出角度信息,解码原理如图 2 所示。

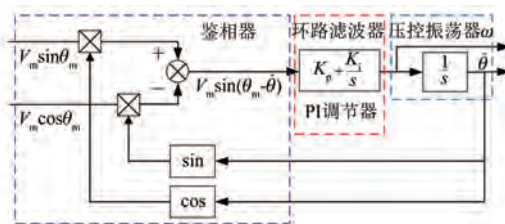


图 2 PLL 解码框图

PLL 由鉴相器、环路滤波器与压控振荡器三个模块组成,其误差传递函数如下:

$$\Phi(s) = \frac{\hat{\theta}(s)}{\theta_m(s)} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (2)$$

式中: $\hat{\theta}$ 为 PLL 输出角度; K_p 与 K_i 分别为环路滤波器的比例与积分增益。

将式(2)转换为二阶系统一般表达式为

$$\Phi(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

式中: ξ 与 ω_n 分别为系统的阻尼系数与带宽, ξ 在工程上一般取 0.707, 当 ω_n 与信号输入频率一致时, 系统的收敛性能最佳。

2 自适应神经网络原理

实际电路中,由于安装偏差、磁场干扰、温度变化、芯片零漂等问题的存在,解码的正余弦信号存在多种误差。当正余弦信号中存在幅值不相等、相位不正交、直流偏置、谐波串扰与噪声误差时,正余弦信号的表达式如下:

$$\begin{cases} v_s = k V_m \sin(\theta_m - \delta) + B_s + \sum_{h_s=2}^M V_{h_s} \sin(h_s \theta_m + \delta_{h_s}) + \eta_s(t) \\ v_c = V_m \cos(\theta_m) + B_c + \sum_{h_c=2}^M V_{h_c} \sin(h_c \theta_m + \delta_{h_c}) + \eta_c(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 与 δ 分别为基波幅值与相位误差; B_s 与 B_c 分别为正、余弦直流偏置误差; $\eta_s(t)$ 与 $\eta_c(t)$ 分

别为正、余弦噪声误差; V_{h_s} 与 V_{h_c} 分别为正、余弦谐波幅值; h_s 与 h_c 分别为正、余弦谐波次数; δ_{h_s} 与 δ_{h_c} 分别为正、余弦谐波相位。

在实际应用中,幅值、相位、直流偏置误差在整体误差中的比例较大。在伺服系统中,角度解算精度要求较高,需要考虑到谐波与噪声误差。通常情况下,低次谐波含量较大,常作为补偿重点。误差补偿后的期望输出为标准的正余弦信号,因此将式(4)改写为

$$\begin{cases} \cos\theta_m = \frac{1}{V_m}u_c - \frac{B_c}{V_m} + \sum_{h_c=2}^M \left[\frac{V_{h_c}\cos\theta_{h_c}}{kV_m}\sin(h_c\theta_m) - \frac{V_{h_s}\sin\theta_{h_c}}{V_m}\cos(h_c\theta_m) \right] \\ \sin\theta_m = \frac{1}{kV_m\delta}u_s - \frac{B_s}{kV_m\cos\delta} - \frac{B_c\tan\delta}{V_m} + \frac{\tan\delta}{V_m}u_c + \sum_{h_s=2}^M \left[-\frac{V_{h_s}\cos\theta_{h_s}}{kV_m\cos\delta}\sin(h_s\theta_m) - \frac{V_{h_s}\sin\theta_{h_s}}{kV_m\cos\delta}\cos(h_s\theta_m) \right] \end{cases} \quad (5)$$

通过式(5)可以看出,将每项的系数作为权重时,可以通过更新系数的方式抑制误差。将正余弦的系数转化为矩阵的形式:

$$\begin{cases} [W_{c1}, W_{c2}, W_{c3}, W_{c4}] = \left[\frac{1}{V_m}, -\frac{B_c}{V_m}, \frac{V_{h_c}\cos\theta_{h_c}}{V_m}, -\frac{V_{h_s}\sin(\theta_{h_c})}{V_m} \right] \\ [W_{s5}, W_{s6}, W_{s7}, W_{s8}, W_{s9}] = \left[\frac{1}{kV_m\delta}, -\frac{B_s}{kV_m\cos\delta} - \frac{B_c\tan\delta}{V_m}, \frac{\tan\delta}{V_m}, -\frac{V_{h_s}\cos\theta_{h_s}}{kV_m\cos\delta}, -\frac{V_{h_s}\sin\theta_{h_s}}{kV_m\cos\delta} \right] \end{cases} \quad (6)$$

同时,将正余弦项设为矩阵形式:

$$\begin{cases} [X_{c1}, X_{c2}, X_{c3}, X_{c4}]^T = \left[u_c, 1, \sin\left(\frac{h_c}{N}\theta\right), \cos\left(\frac{h_c}{N}\theta\right) \right]^T \\ [X_{s5}, X_{s6}, X_{s7}, X_{s8}, X_{s9}]^T = \left[u_s, 1, u_c, \sin\left(\frac{h_s}{N}\theta\right), \cos\left(\frac{h_s}{N}\theta\right) \right]^T \end{cases} \quad (7)$$

因此,式(5)可以重写为

$$\begin{cases} \cos\theta_m = [W_{c1}, W_{c2}, W_{c3}, W_{c4}] \cdot [X_{c1}, X_{c2}, X_{c3}, X_{c4}]^T \\ \sin\theta_m = [W_{s5}, W_{s6}, W_{s7}, W_{s8}, W_{s9}] \cdot [X_{s5}, X_{s6}, X_{s7}, X_{s8}, X_{s9}]^T \end{cases} \quad (8)$$

通过上述分析可以看出标准的正余弦可以通过消除误差项得出。神经网络对误差进行补偿后输入 PLL, 然后利用 PLL 输出正余弦信号反馈至神经网络形成闭环控制。通过输入与输出的差值不断更新权重与步长, 然后反馈至单层神经网络抑制相应误差干扰。单层 ANN 的算法框图如图 3 所示。

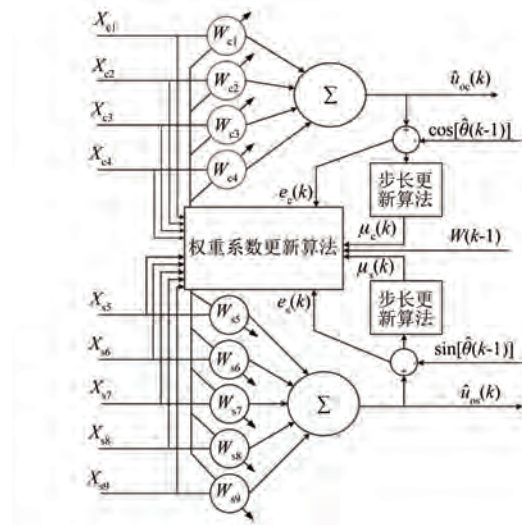


图3 ANN算法框图

假设 ANN 输出的补偿后的正余弦信号分别为 u_{os} 与 u_{oc} , 则 ANN 与 PLL 输出的正余弦误差为

$$\begin{cases} e_s(k) = u_{os} - \sin[\hat{\theta}(k-1)] \\ e_c(k) = u_{oc} - \cos[\hat{\theta}(k-1)] \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,当 ANN 输出趋近于标准正余弦信号时,PLL 输出角度与 ANN 中的基波角度一致,即 $\hat{\theta}=\theta_m$ 。此时,误差 e_s 与 e_c 均为 0,抑制了系统中的误差项。对于神经网络而言,权重系数更新算法尤为重要。通过上述分析可以看出,下一时刻权重系数的更新与上一时刻的权重系数、正余弦输入、角度误差等均有关。因此,权重系数更新方程如下:

$$\begin{cases} \hat{W}_s(k+1) = \hat{W}_s(k) - \mu_s X_s(k) e_s(k) \\ \hat{W}_c(k+1) = \hat{W}_c(k) - \mu_c X_c(k) e_c(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: μ_s 与 μ_c 分别为正、余弦权重系数更新的步长, 此值越大收敛速度越快, 但是容易引起振荡, 越小输出精度越高, 但是收敛速度变慢。

文献[7-8]提出了步长公式:

$$\begin{cases} \mu_s(k+1) = \lambda_1 \mu_s(k) + \lambda_2 e_s^2(k) \\ \mu_c(k+1) = \lambda_1 \mu_c(k) + \lambda_2 e_c^2(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中: λ_1 与 λ_2 分别为正、余弦及其误差相关性系数。

实际使用中 λ_1 较大, 一般大于 0.9, 以防止步长变化过于剧烈导致系统振荡, λ_2 一般较小, 其决定了当前正余弦误差值平方的影响, 误差值大时, 步长逐渐增大, 加速收敛。当系统趋于稳定时, 误差降低, 此时步长降低, 稳态精度提升。

3 仿真与试验

3.1 仿真验证

在上述基于 ANN 误差补偿算法的理论分析中可知, 该算法具有误差补偿全面、收敛速度快与收敛速度实时调整的特性。在 MATLAB/Simulink 中设置电机转速为 3 000 r/min, 输入正、余弦幅值分别为 1.2 V 与 1.0 V、正弦相位偏移 $\pi/36$ rad、直流偏置分别为 0.1 V 与 -0.1 V、三次谐波幅值为 0.05 V、随机噪声幅值为 0.02 V。仿真中, 在 0.2 s 时加入 ANN 算法, 0.3 s 时加入谐波补偿算法。仿真结果如图 4 所示。

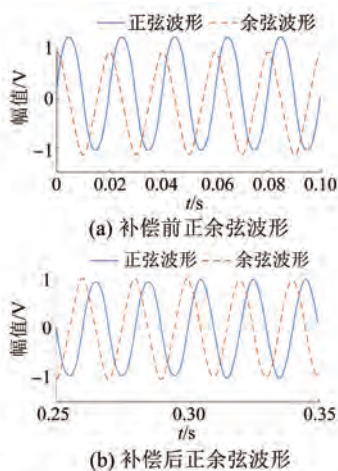


图 4 误差补偿前后正余弦波形

图 4(a) 为输入的正余弦信号, 可以看出此时由于包含各类误差, 正余弦信号波形畸变严重。图 4(b) 为 ANN 补偿后的正余弦波形, 在 0.25 ~

0.30 s 之间除谐波之外的误差均得到补偿, 正余弦信号直流偏置基本消除, 幅值误差降低。在 0.30~0.35 s 之间, 谐波补偿加入, 此时正余弦信号畸变进一步降低, 相位基本正交且幅值稳定在 1 V。正余弦信号补偿前后的快速傅里叶变换 (FFT) 分析如图 5 和图 6 所示。

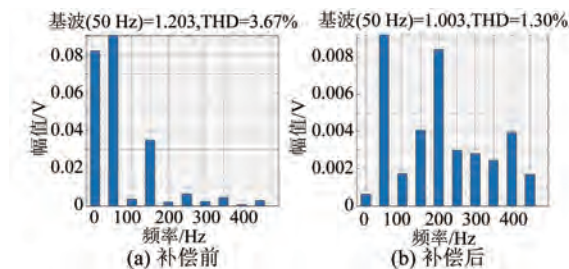


图 5 谐波补偿前后正弦 FFT 分析

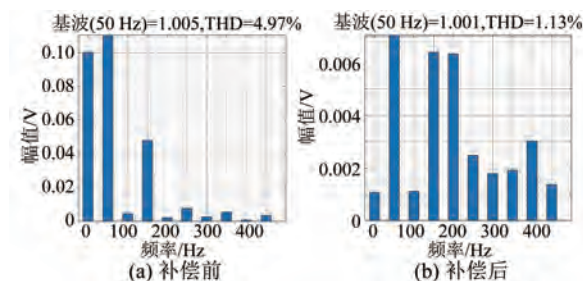


图 6 谐波补偿前后余弦 FFT 分析

图 5(a) 与图 6(a) 分别为误差补偿前的正余弦信号, 从图中可以看出, 直流电压分别为 0.082 V 与 0.1 V, 基波幅值分别为 1.203 V 与 1.005 V, 三次谐波幅值分别为 0.035 V 与 0.047 V。图 5(b) 与图 6(b) 为加入 ANN 同时对谐波误差进行补偿之后的 FFT 分析图, 直流电压分别降至 0.000 7 V 与 0.001 1 V, 基波幅值分别降为 1.003 V 与 1.001 V, 三次谐波幅值分别降为 0.004 0 V 与 0.006 5 V, 总谐波失真 (THD) 从补偿前的 3.67% 与 4.97% 降至 1.30% 与 1.13%。通过上述对补偿前后正余弦信号的 FFT 分析可知, ANN 算法有效补偿了输入正余弦信号中的直流偏置、幅值不相等与谐波误差。分析误差补偿前后的角度及其误差信号波如图 7 与图 8 所示。

由图 7 和图 8 可以看出, 0.18~0.20 s 未加入 ANN 算法时, 解算角度在参考角度上下大幅波动, 角度误差在 -0.30~0.15 rad 波动。随后 0.20~0.22 s 时加入除谐波外的误差补偿, 角度

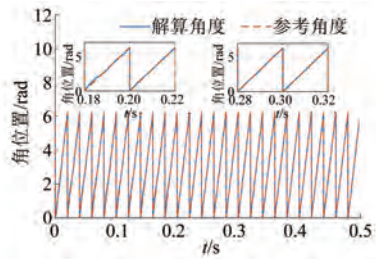


图7 角度跟踪波形

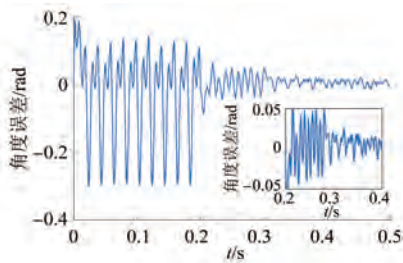


图8 角度跟踪误差波形

收敛无明显偏移且跟踪误差降至 0.030 ~ 0.045 rad。在 0.3 s 时加入谐波抑制,可以看出角度跟踪迅速收敛,角度误差进一步降低至 -0.018~0.020 rad。

通过补偿前后正余弦波形与 FFT 分析可以看出,误差补偿算法可有效抑制正余弦信号中的直流、幅值与谐波误差。同时,通过角度跟踪及其误差波形分析可以看出,加入误差补偿算法之后角度误差迅速下降,加入谐波抑制算法之后误差进一步降低,并且算法响应速度快、延迟小。

3.2 试验验证

基于 200 W 永磁同步电机搭建试验平台,通过试验验证算法的可靠性。磁编码器中磁阻芯片为 Infineon 公司的 TLE5501,信号调理电路运放芯片为 TI 公司的 TL082C, MCU 为 ST 公司的 STM32G431,并利用 ST-Link 实现程序下载与调试功能。试验平台如图 9 所示。

试验平台中采用的永磁同步电机自带高精度光电编码器,采用其角度输出作为本文设计磁编码器的参考角度。通过 MCU 的 DAC 功能输出解算角度的电压值,然后利用录波仪(型号为 DL850EV)采集电压信号。最后,将录波仪采集的信号导出至 MATLAB 分析角度及其误差信息。本设计采用 STM32 支持 MATLAB/Simulink 生成

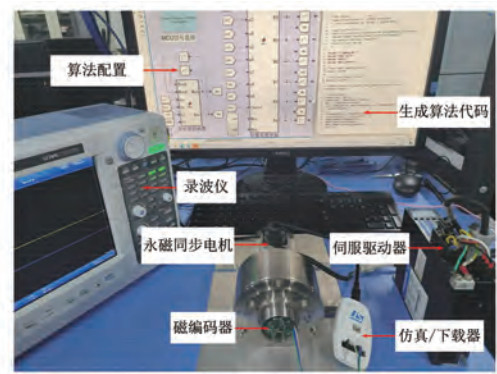


图9 试验平台

代码,然后利用 Cube-MX 软件初始化所使用的模块,最终生成可执行的程序。其中,Cube-MX 配置如图 10 所示。

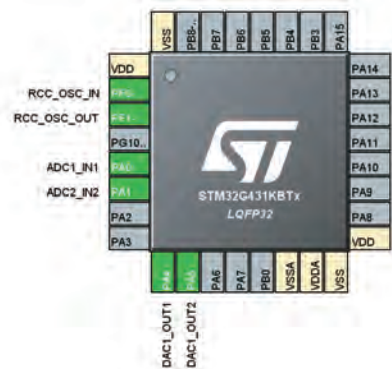


图10 MATLAB/Simulink 算法配置

为了验证本文算法对各类误差的抑制能力,在安装磁钢与磁编码器时,空间上偏移一定角度,当电机转动一周时,磁敏电阻采集到的磁场幅值不相等,引入幅值与谐波误差。同时可以在磁编码器的其中一条信号调理电路中加入不同的直流偏置。人为在正余弦信号中加入幅值不相等、谐波串扰与直流偏置等误差,验证算法在极端条件下的误差补偿与解码性能。输入 MCU 的正余弦信号波形如图 11 所示。

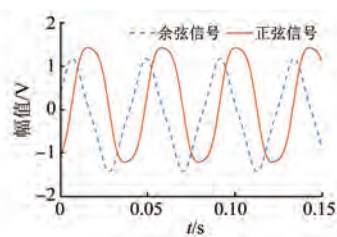


图11 MCU 输入正余弦信号波形

观察图 11 的输入正余弦信号波形可以看出,正余弦信号存在直流偏置误差,导致波形零点发生偏移。同时,由于幅值不相等与谐波误差的存在,信号发生较为严重的畸变。将正余弦信号传入 MCU 之后,利用 ANN-PLL 输出解算角度波形如图 12 所示。

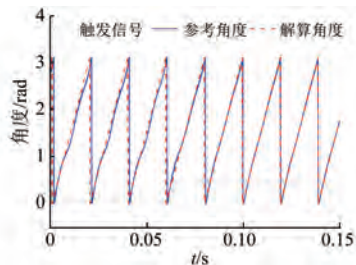


图 12 角度跟踪波形

由图 12 可以看出,在 0.065 s 之前直接利用 PLL 解算角度,此时解算角度波动较大。在 0.065 s 左右利用按钮触发加入 ANN 误差补偿算法,解算角度经过 0.01 s 左右收敛至参考角度。参考角度与解算角度的误差如图 13 所示。

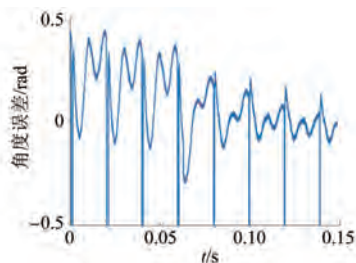


图 13 参考角度与解算角度误差波形

分析图 13 可以看出,在误差补偿算法加入系统之前,误差在 $-0.12 \sim 0.40$ rad 波动。其中包含较大的相位延迟误差。在 0.065 s 左右,ANN 误差补偿算法加入系统,此时误差迅速收敛至 ± 0.1 rad。

通过仿真与试验验证可以看出,所提算法可以有效抑制直流偏置、幅值、相位与谐波误差,并且具有较快的响应速度。在仿真中,角度误差波动范围从 0.45 rad 降低至 0.038 rad,试验中从 0.52 rad 降至 0.2 rad。

4 结 语

针对磁编码器正余弦信号中各类误差导致的解码精度低的问题,本文基于神经网络的原理,设计出具有综合误差补偿功能的单层 ANN 算法。通过公式推导、仿真与试验验证可以看出,该算法具有误差补偿全面、响应速度快、鲁棒性强的优势,可以在不增加成本的基础上用于现有磁编码器的设计。

【参考文献】

- [1] NANDAPURKAR K B, SREEKANTAN A C, DUTTA P K. Performance investigation of a simplified TMR-based rotary position sensing system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9505408.
- [2] WANG H, WANG S, RAJAMANI R. Electromagnetic angular position sensing using high-magnetic-permeability materials [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(12): 11626.
- [3] HOANG V H, JEAN W J. Signal compensation and extraction of high resolution position for sinusoidal magnetic encoders [C]//International Conference on Control, Automation and Systems, 2007.
- [4] LARA J, XU J, CHANDRA A. A novel algorithm based on polynomial approximations for an efficient error compensation of magnetic analog encoders in PMSMs for EVs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3377.
- [5] 李伟伟. 考虑信号误差的轴角——数字转换器研究与设计 [D]. 上海: 上海大学, 2016.
- [6] 魏星原. 旋转变压器解码技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [7] HARRIS R, CHABRIES D, BISHOP F. A variable step (VS) adaptive filter algorithm [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1986, 34(2): 309.
- [8] KWONG R H, JOHNSTON E W. A variable step size LMS algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(7): 1633.